
**ხმის ვოკალური ბიომარკერები გულის უკმარისობის მართვაში:
პათოფიზიოლოგიური საფუძვლები, თანამედროვე მტკიცებულებები და
მომავალი პერსპექტივები**

ნინო სოზაშვილი¹; თეონა ძაგნიძე²

¹ექიმი-კარდიოლოგი აკადემიკოს .ვ.ბოჭორიშვილის კლინიკა; ²MD,MSc,PhD

აბსტრაქტი

შესავალი: გულის ქრონიკული უკმარისობა (გქუ) წარმოადგენს თანამედროვე ჯანდაცვის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან გამოწვევას, რომელიც ასოცირებულია ავადობის, სიკვდილიანობისა და განმეორებითი ჰოსპიტალიზაციის მატების მნიშვნელოვან რისკთან. მიუხედავად მედიკამენტური თერაპიის გაუმჯობესებისა, პაციენტთა ნაწილი სამედიცინო დაწესებულებიდან გაწერის შემდეგ კვლავ იმყოფება დეკომპენსაციის მაღალი რისკის ქვეშ. არსებული დისტანციური მონიტორინგის მეთოდები, მათ შორის სხეულის წონის ყოველდღიური კონტროლი და სიმპტომების თვითშეფასება, ხშირად ვერ უზრუნველყოფს სითხის შეკავებისა და ფილტვის კონგესტიის ადრეულ გამოვლენას. გულის უკმარისობის მართვის ერთ-ერთ მთავარ გამოწვევას წარმოადგენს მდგომარეობის გაუარესების ადრეული გამოვლენა, განსაკუთრებით იმ ეტაპზე, როდესაც ვითარდება სითხის შეკავება და ფილტვის კონგესტია, თუმცა კლინიკური სიმპტომები ჯერ კიდევ მინიმალურად არის გამოხატული.

არსებული მონიტორინგის მეთოდები, მათ შორის სხეულის წონის ყოველდღიური კონტროლი და სიმპტომების თვითშეფასება, ყოველთვის ვერ უზრუნველყოფს პათოფიზიოლოგიური ცვლილებების ადრეულ იდენტიფიცირებას.

ბოლო წლებში ციფრული ჯანმრთელობისა და ხელოვნური ინტელექტის (AI) ტექნოლოგიების განვითარებამ შექმნა ახალი შესაძლებლობები ქრონიკული დაავადებების დისტანციური მართვისთვის. მათ შორის განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ვოკალური ბიომარკერები — ხმის აკუსტიკური მახასიათებლების საფუძველზე მიღებული ციფრული ინდიკატორები, რომლებიც შესაძლოა ასახავდეს ორგანიზმის ფიზიოლოგიურ ცვლილებებს.

მიზანი: წინამდებარე მიმოხილვის მიზანია გულის უკმარისობის მართვაში ვოკალური ბიომარკერების გამოყენების პათოფიზიოლოგიური საფუძვლების, თანამედროვე კლინიკური მტკიცებულებების, ტექნოლოგიური შესაძლებლობებისა და არსებული გამოწვევების შეფასება.

მეთოდოლოგია: ჩატარდა ნარატიული ლიტერატურული მიმოხილვა. ლიტერატურის მოძიება განხორციელდა PubMed/MEDLINE, Scopus და Web of Science მონაცემთა ბაზებში. ძიებისას გამოყენებული იქნა შემდეგი საკვანძო ტერმინები: „heart failure“, „vocal biomarkers“, „voice analysis“, „artificial intelligence“, „digital biomarkers“, „remote monitoring“. ძირითადი ყურადღება დაეთმო 2020–2025 წლებში გამოქვეყნებულ კვლევებს, რომლებიც აფასებდნენ ვოკალური მახასიათებლების კავშირს გულის უკმარისობის კლინიკურ მდგომარეობასთან, ჰოსპიტალიზაციის რისკთან და დისტანციური მონიტორინგის შესაძლებლობებთან.

ძირითადი მიგნებები

არსებული კვლევები მიუთითებს, რომ ხმის გარკვეული აკუსტიკური მახასიათებლები შესაძლოა დაკავშირებული იყოს გულის უკმარისობის დროს განვითარებულ ფიზიოლოგიურ ცვლილებებთან. ვოკალური ბიომარკერების ანალიზში ხშირად გამოიყენება ისეთი პარამეტრები, როგორიცაა: ჯიტერი (jitter) იგი წარმოადგენს ხმის აკუსტიკური ანალიზის უმნიშვნელოვანეს პარამეტრს. ჯიტერი გამოიყენება სახმო იოგების ვიბრაციის მიკრო-არასტაბილურობის შესაფასებლად, შიმერი (shimmer) შიმერი (Shimmer) არის ბგერის ამპლიტუდის (ხმამაღლობის) პერიოდული ცვალებადობის საზომი., ჰარმონია-ხმაურის თანაფარდობა (HNR), მეტყველების სიჩქარე, ფონაციის ხანგრძლივობა, მეტყველების პაუზების სტრუქტურა. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებულმა ალგორითმებმა აჩვენა შესაძლებლობა, გამოავლინონ ხმის ისეთი მცირე ცვლილებები, რომლებიც შესაძლოა დაკავშირებული იყოს გულის უკმარისობის გამწვავების ადრეულ ეტაპებთან.

თუმცა, არსებული მტკიცებულებები ჯერ კიდევ საჭიროებს დამატებით დადასტურებას, განსაკუთრებით ფართომასშტაბიანი, მრავალცენტრული და განსხვავებულ პოპულაციებზე ჩატარებული კვლევების საშუალებით.

დასკვნა: ვოკალური ბიომარკერები წარმოადგენს პერსპექტიულ მიმართულებას ციფრულ კარდიოლოგიაში. მიუხედავად იმისა, რომ ამ ეტაპზე ისინი ვერ ჩაანაცვლებენ გულის უკმარისობის სტანდარტულ კლინიკურ შეფასებას, შესაძლებელია მათი გამოყენება როგორც დამატებითი ციფრული ინსტრუმენტის პაციენტთა დისტანციური მონიტორინგისა და ადრეული რისკის შეფასებისთვის. მომავალში საჭიროა დამატებითი კვლევები მათი კლინიკური ეფექტურობის, სანდოობისა და ყოველდღიურ პრაქტიკაში ინტეგრაციის შესაძლებლობების შესაფასებლად.

საკვანძო სიტყვები: გულის უკმარისობა; ვოკალური ბიომარკერები; ხელოვნური ინტელექტი; ციფრული ბიომარკერები; დისტანციური მონიტორინგი; ხმის ანალიზი; ციფრული ჯანმრთელობა; პერსონალიზებული მედიცინა.

1. შესავალი

გულის უკმარისობა წარმოადგენს კომპლექსურ კლინიკურ სინდრომს, რომელიც ვითარდება გულის სტრუქტურული ან ფუნქციური დარღვევების შედეგად და იწვევს გულის მიერ ორგანიზმის მეტაბოლური მოთხოვნილებების დაკმაყოფილების უნარის დაქვეითებას.

თანამედროვე თერაპიული მიდგომების, მათ შორის ანგიოტენზინის რეცეპტორისა და ნეპრილიზინის ინჰიბიტორების, ბეტა-ბლოკერების, მინერალოკორტიკოიდული რეცეპტორების ანტაგონისტებისა და SGLT2 ინჰიბიტორების გამოყენების მიუხედავად, გულის უკმარისობის დეკომპენსაცია კვლავ რჩება ჰოსპიტალიზაციის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზად.

გულის უკმარისობის გამწვავება ხშირად არ ვითარდება მოულოდნელად. ხშირ შემთხვევაში წინ უსწრებს თანდათანობითი ჰემოდინამიკური ცვლილებები, მათ შორის გულის მარცხენა ნახევარში შევსების წნევის მატება, ვენური სისტემის გადატვირთვა და ფილტვის შეშუპების პროგრესირება.

პრობლემას წარმოადგენს ის, რომ აღნიშნული ცვლილებები შესაძლოა განვითარდეს იმ პერიოდში, როდესაც პაციენტს ჯერ კიდევ არ აქვს გამოხატული სიმპტომები ან მათი ინტენსივობა არასაკმარისია და პაციენტი ვერ ახერხებს ამ ეტაპზე ექიმთან დაკავშირებას, ვინაიდან სუბიექტურად ჯერ თავს დამაკმაყოფილებლად გრძნობს.

თვითშეფასების ტრადიციული მეთოდები, როგორიცაა სხეულის წონის მონიტორინგი, არტერიული წნევის კონტროლი და სიმპტომების შეფასება, მნიშვნელოვან როლს ასრულებს პაციენტების მართვაში, თუმცა მათი მგრძნობელობა ადრეული ცვლილებების გამოვლენისას შეზღუდულია.

ამ ფონზე განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს ციფრული ბიომარკერების განვითარება. ციფრული ბიომარკერი წარმოადგენს ობიექტურად გაზომვად ფიზიოლოგიურ ან ქცევით მონაცემს, რომელიც შესაძლებელია შეგროვდეს ციფრული მოწყობილობების საშუალებით და გამოყენებული იქნას ჯანმრთელობის მდგომარეობის შეფასებისთვის.

ვოკალური ბიომარკერები ამ მიმართულების ერთ-ერთი ახალი სფეროა. ადამიანის ხმა წარმოადგენს რთულ ბიოლოგიურ სიგნალს, რომელზეც გავლენას ახდენს სასუნთქი სისტემის ფუნქცია, ხმის იოგების ვიბრაცია, ნეირომუსკულური კონტროლი და ზოგადი ფიზიოლოგიური მდგომარეობა.

ხელოვნური ინტელექტისა და მანქანური სწავლების ალგორითმების განვითარებამ შესაძლებელი გახადა ხმის სიგნალებში არსებული მცირე ცვლილებების ავტომატური აღმოჩენა და ანალიზი.

შესაბამისად, ვოკალური ბიომარკერები განიხილება როგორც პოტენციური დამატებითი ინსტრუმენტი გულის უკმარისობის მქონე პაციენტების დისტანციური მონიტორინგისა და მდგომარეობის ადრეული ცვლილებების გამოვლენისთვის.

2. ვოკალური ბიომარკერების პათოფიზიოლოგიური საფუძვლები გულის უკმარისობის დროს ადამიანის ხმა წარმოადგენს კომპლექსურ ბიოლოგიურ სიგნალს, რომლის ფორმირება დამოკიდებულია სასუნთქი სისტემის, ხორხის, ნერვული რეგულაციისა და კუნთოვანი აპარატის კოორდინირებულ ფუნქციონირებაზე. შესაბამისად, ნებისმიერი მდგომარეობა, რომელიც გავლენას ახდენს სუნთქვის მექანიკაზე, ჰაერის ნაკადზე ან ფონაციის პროცესზე, შესაძლოა აისახოს ხმის აკუსტიკურ მახასიათებლებზე. გულის უკმარისობის დროს განვითარებული ჰემოდინამიკური ცვლილებები, განსაკუთრებით მარცხენა წინაგულსა და მარცხენა პარკუჭში წნევის მატება და ფილტვის ვენური სისტემის გადატვირთვა, წარმოადგენს იმ შესაძლო მექანიზმებს, რომელთა საშუალებითაც დაავადების პროგრესირება შესაძლოა აისახოს ხმოვან სიგნალზე.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ვოკალური ცვლილებები არ წარმოადგენს გულის უკმარისობის სპეციფიკურ ნიშანს და მათი ინტერპრეტაცია უნდა მოხდეს სხვა კლინიკურ, ლაბორატორიულ და ინსტრუმენტულ მონაცემებთან ერთობლიობაში.

2.1. ფილტვის კონგესტია და რესპირატორული ცვლილებები

გულის უკმარისობის დროს, განსაკუთრებით გულის მარცხენა ღრუებში ავსების წნევის მატება და მოცულობითი გადატვირთვა იწვევს ვენურ სისტემისა და ფილტვის კაპილარულ ქსელში ჰიდროსტატიკური წნევის მატებას.

შედეგად შესაძლებელია განვითარდეს: ფილტვის ინტერსტიციული შეშუპება, ალვეოლურ-კაპილარული ბარიერის ცვლილებები, ფილტვის ქსოვილის ელასტიკურობის შემცირება, რესპირატორული დატვირთვის ზრდა. ფილტვის შეშუპება გავლენას ახდენს სუნთქვის პროცესზე და შესაძლოა გამოიწვიოს: სუნთქვის სიხშირის ცვლილება, მეტყველების დროს სუნთქვითი პაუზების გახშირება, ხანგრძლივი ფრაზების წარმოთქმის უნარის შემცირება, მეტყველების საერთო დინამიკის ცვლილება. აღნიშნული ცვლილებები შეიძლება აისახოს ხმის სიგნალის ისეთ პარამეტრებზე, რომლებიც დაკავშირებულია მეტყველების რიტმთან და ფონაციის თავისებურებებთან.

2.2. ხმის წარმოქმნის ფიზიოლოგია და გულის უკმარისობასთან შესაძლო კავშირი

ხმის წარმოქმნა ეფუძნება სამ ძირითად კომპონენტს:

1. **რესპირატორული სისტემა** — უზრუნველყოფს ჰაერის ნაკადის მოძრაობას

2. ხორხი და ხმის იოგები — გარდაქმნის ჰაერის ნაკადს ხმოვან ვიბრაციად

3. რეზონატორული სისტემა — განსაზღვრავს ხმის ტემბრსა და ხარისხს.

გულის უკმარისობის დროს რესპირატორული სისტემის ფუნქციური ცვლილებები შესაძლოა გავლენას ახდენდეს ხმის წარმოქმნის პირობებზე. მაგალითად: შემცირებული ფილტვის მოცულობა, გაზრდილი სუნთქვითი ძალისხმევა, ჰაერის ნაკადის არასტაბილურობა. შესაძლოა დაკავშირებული იყოს ფონაციის ცვლილებებთან. თანამედროვე AI-ზე დაფუძნებული სისტემები ცდილობენ სწორედ ამ მცირე ცვლილებების გამოვლენას, რომლებიც შესაძლოა მიუთითებდეს პაციენტის ფუნქციური მდგომარეობის გაუარესებაზე მანამდე, სანამ განვითარდება მკვეთრი კლინიკური სიმპტომები.

2.3. ვოკალური ტრაქტის ცვლილებები და ფონაციის მახასიათებლები

ხმის ხარისხი დამოკიდებულია ხმის იოგების ვიბრაციის რეგულარულობაზე. ვიბრაციის პროცესზე გავლენას ახდენს: ქსოვილის ელასტიკურობა, ლორწოვანი გარსის მდგომარეობა, კუნთოვანი სისტემის მდგომარეობა, ჰაერის ნაკადი.

გულის უკმარისობის მქონე პაციენტებში სისტემურმა ფიზიოლოგიურმა სტრესმა, სითხის ბალანსის ცვლილებებმა და რესპირატორულმა დატვირთვამ შესაძლოა გამოიწვიოს ხმის ისეთი მახასიათებლების ცვლილება, როგორიცაა: ხმის პერიოდულობა, ამპლიტუდის სტაბილურობა, ხმოვანი სიგნალის სისუფთავე.

თუმცა, არსებული მონაცემები მიუთითებს, რომ აღნიშნული ცვლილებები უფრო მეტად წარმოადგენს კომპლექსური ფიზიოლოგიური მდგომარეობის ირიბ მაჩვენებელს, ვიდრე უშუალოდ გულის უკმარისობის სპეციფიკურ მარკერს.

2.4. კარდიო-ვოკალური სინდრომი (ორტნერის სინდრომი)

გულისა და ხმის ცვლილებების ურთიერთკავშირის ერთ-ერთი ისტორიულად ცნობილი მაგალითია კარდიო-ვოკალური სინდრომი, ასევე ცნობილი როგორც ორტნერის სინდრომი. აღნიშნული მდგომარეობა ვითარდება მაშინ, როდესაც გულ-სისხლძარღვთა სტრუქტურების გადამაბვა იწვევს მარცხენა ხორხის ნერვის (left recurrent laryngeal nerve) კომპრესიას, რომელიც ანატომიურად გადის აორტის რკალის მიმდებარედ, რის გამოც გარკვეული პათოლოგიური მდგომარეობების დროს შესაძლებელია მისი კომპრესია. კლინიკურად ეს შეიძლება გამოვლინდეს შემდეგი სიმპტომებით: ხმის ჩახლეჩა, ტემბრის ცვლილება, ფონაციის დაქვეითება.

2.5. ვოკალური ბიომარკერები როგორც კომპლექსური ციფრული სიგნალი

მნიშვნელოვანია, რომ თანამედროვე მიდგომები არ ცდილობს ერთი კონკრეტული ხმის პარამეტრის გამოყენებას დიაგნოსტიკისთვის. ხელოვნური ინტელექტის მოდელები აანალიზებენ მრავალრიცხოვან მახასიათებლებს ერთობლივად, მათ შორის: სიხშირით

მახასიათებლებს, დროით მახასიათებლებს, სპექტრულ მახასიათებლებს, მეტყველების დინამიკას.

ამრიგად, ვოკალური ბიომარკერი უფრო სწორად უნდა განიხილებოდეს როგორც მრავალპარამეტრული ციფრული პროფილი, რომელიც ასახავს პაციენტის ფიზიოლოგიური მდგომარეობის ცვლილებების ალბათობას.

3. ხელოვნური ინტელექტი და ხმის ციფრული ანალიზის ტექნოლოგიები

ციფრული ჯანმრთელობის ტექნოლოგიების სწრაფმა განვითარებამ მნიშვნელოვნად გააფართოვა ბიოლოგიური სიგნალების გამოყენების შესაძლებლობები დაავადებების მონიტორინგისა და რისკის სტრატეგიკაციის პროცესში. ამ კონტექსტში ვოკალური ბიომარკერები წარმოადგენს ციფრული ბიომარკერების ერთ-ერთ განვითარებად მიმართულებას, რომლის საფუძველიცაა ადამიანის ხმოვანი სიგნალის რაოდენობრივი ანალიზი და ასოციაცია პათოფიზიოლოგიურ მდგომარეობებთან.

ხმის ანალიზის თანამედროვე სისტემები ეფუძნება ხელოვნური ინტელექტის (Artificial Intelligence, AI), მანქანური სწავლების (Machine Learning, ML) და ღრმა სწავლების (Deep Learning, DL) ალგორითმებს, რომლებიც შესაძლებელს ხდის აუდიოსიგნალებიდან ისეთი მახასიათებლების ავტომატურ ექსტრაქციას, რომელთა გამოვლენა ტრადიციული სმენითი შეფასებით შეუძლებელია. ვოკალური ანალიზის ძირითადი პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ მეტყველების სიგნალი წარმოადგენს მრავალგანზომილებიან მონაცემთა წყაროს, რომელიც შეიცავს ინფორმაციას როგორც ფონაციის პროცესის, ასევე რესპირატორული და ნეირომუსკულური ფუნქციის შესახებ.

3.1. აუდიოსიგნალის ციფრული დამუშავება და მახასიათებლების ექსტრაქცია

ვოკალური ბიომარკერების ანალიზის პირველი ეტაპია აუდიოსიგნალის ციფრული დამუშავება. ხმოვანი ჩანაწერი გარდაიქმნება ციფრულ მონაცემებად, რის შემდეგაც სპეციალური ალგორითმები ახორციელებენ მისი სტრუქტურული მახასიათებლების იდენტიფიცირებას. ძირითადად ანალიზდება სამი ტიპის მახასიათებელი:

1. აკუსტიკური მახასიათებლები

მოიცავს: ფუნდამენტურ სიხშირეს (Fundamental Frequency, F0), სიხშირის ცვალებადობას, ამპლიტუდის ცვლილებებს, ჰარმონიულ კომპონენტებს. აღნიშნული პარამეტრები ასახავს ხმის იოგების ვიბრაციის სტაბილურობასა და ფონაციის ხარისხს.

2. სპექტრული მახასიათებლები

სპექტრული ანალიზი აფასებს ხმის ენერგიის განაწილებას სხვადასხვა სიხშირის დიაპაზონში. ეს მახასიათებლები ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე ხმის ამომცნობ სისტემებსა და ბიოლოგიური სიგნალების კლასიფიკაციაში.

3. დროითი მახასიათებლები

დროითი ანალიზი აფასებს: მეტყველების სიჩქარეს, პაუზების ხანგრძლივობას, ფონაციის უწყვეტობას, სუნთქვითი ციკლის ცვლილებებს. გულის უკმარისობის შემთხვევაში აღნიშნული მახასიათებლები შესაძლოა ასახავდეს რესპირატორული დატვირთვის ზრდასთან დაკავშირებულ ფუნქციურ ცვლილებებს.

3.2. მანქანური სწავლება და ღრმა სწავლების ალგორითმები

ტრადიციული სტატისტიკური მეთოდებისგან განსხვავებით, მანქანური სწავლების ალგორითმებს შეუძლიათ დიდი მოცულობის მრავალგანზომილებიანი მონაცემების დამუშავება და ისეთი კომპლექსური კავშირების გამოვლენა, რომლებიც წინასწარ განსაზღვრული ჰიპოთეზებით ყოველთვის ვერ იდენტიფიცირდება.

ვოკალური ბიომარკერების კვლევებში გამოყენებულია სხვადასხვა მიდგომა. ღრმა სწავლების მოდელები განსაკუთრებით პერსპექტიულია ხმოვანი მონაცემების ანალიზში, რადგან მათ შეუძლიათ უშუალოდ ნედლი აუდიოსიგნალებიდან მნიშვნელოვანი მახასიათებლების ავტომატური ამოღება.

3.3. სმარტფონზე დაფუძნებული ვოკალური მონიტორინგი

ვოკალური ბიომარკერების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი უპირატესობა არის მათი პოტენციური ინტეგრაცია ყოველდღიურად გამოყენებად ციფრულ მოწყობილობებში. სმარტფონზე დაფუძნებული სისტემები იძლევა შესაძლებლობას:

პაციენტმა დამოუკიდებლად განახორციელოს ხმოვანი ჩანაწერის რეგულარული მიწოდება, მონაცემები ავტომატურად დამუშავდეს ღრუბლოვანი პლატფორმებზე, გამოვლენილი ცვლილებები ინტეგრირდეს კლინიკური გადაწყვეტილების მხარდაჭერის სისტემებში.

ამ მიდგომის მთავარი უპირატესობაა მისი არაინვაზიურობა, დაბალი ღირებულება და მასშტაბირების შესაძლებლობა. თუმცა, კლინიკურ პრაქტიკაში დანერგვამდე აუცილებელია შეფასდეს ისეთი ფაქტორების გავლენა, როგორიცაა: სხვადასხვა მოწყობილობის მიკროფონის ტექნიკური მახასიათებლები, გარემოს ხმაური, ჩანაწერის სტანდარტიზაციის ხარისხი, პაციენტის ტექნოლოგიური უნარები.

3.4. ხელოვნური ინტელექტის როლი კლინიკური გადაწყვეტილების მხარდაჭერაში

ვოკალური ბიომარკერები არ განიხილება როგორც დამოუკიდებელი დიაგნოსტიკური ინსტრუმენტი. მათი პოტენციური კლინიკური ღირებულება მდგომარეობს არსებული მონაცემების გაძლიერებაში.

მომავალში შესაძლებელია მათი ინტეგრაცია: ელექტრონულ სამედიცინო ჩანაწერებთან, პაციენტის მიერ მოწოდებულ სიმპტომურ მონაცემებთან, ფიზიოლოგიურ მაჩვენებლებთან, ტარებადი მოწყობილობების (wearables) მონაცემებთან. ასეთი ინტეგრირებული მიდგომა შეიძლება გახდეს პერსონალიზებული მედიცინის ერთ-ერთი

მნიშვნელოვანი კომპონენტი, სადაც მკურნალობის გადაწყვეტილებები ეფუძნება პაციენტის მდგომარეობის უწყვეტ, დინამიკურ შეფასებას.

4. ვოკალური ბიომარკერების ძირითადი აკუსტიკური პარამეტრები და მათი კლინიკური მნიშვნელობა

ვოკალური ბიომარკერების კვლევებში გამოყენებული აკუსტიკური პარამეტრები წარმოადგენს ხმის სიგნალიდან მიღებულ რაოდენობრივ მახასიათებლებს, რომლებიც ასახავს ფონაციის სტაბილურობას, ხმის ხარისხს, მეტყველების დინამიკასა და რესპირატორულ ფუნქციასთან დაკავშირებულ ცვლილებებს. გულის უკმარისობის კონტექსტში აღნიშნული პარამეტრები არ განიხილება როგორც დაავადების სპეციფიკური მარკერები, არამედ როგორც მრავალპარამეტრული ციფრული პროფილის კომპონენტები, რომლებიც შესაძლოა ასახავდეს პაციენტის ფუნქციური მდგომარეობის ცვლილებებს.

ცხრილი 1. ვოკალური ბიომარკერების ძირითადი აკუსტიკური პარამეტრები და მათი შესაძლო კლინიკური მნიშვნელობა გულის უკმარისობის დროს

აკუსტიკური პარამეტრი	განმარტება	ბიოლოგიური საფუძველი	შესაძლო მნიშვნელობა გულის უკმარისობის მართვაში
Jitter	ხმის ფუნდამენტური სიხშირის (Fundamental Frequency, F0) მცირე პერიოდული ვარიაციები თანმიმდევრულ ვოკალურ ციკლებს შორის	ასახავს ხმის იოგების ვიბრაციის პერიოდულობის სტაბილურობას	შესაძლოა ასახავდეს ფონაციის სტაბილურობის ცვლილებებს, რომლებიც დაკავშირებულია რესპირატორულ ან ზოგად ფიზიოლოგიურ ცვლილებებთან
Shimmer	ხმის ტალღის ამპლიტუდის ცვალებადობა ვოკალურ ციკლებს შორის	დაკავშირებულია ხმის იოგების ვიბრაციის ენერგეტიკულ სტაბილურობასთან	შესაძლოა მიუთითებდეს ხმის ხარისხის ცვლილებაზე და გამოყენებულ იქნას, როგორც ერთ-ერთი მახასიათებელი AI მოდელებში
Harmonics-to-Noise Ratio (HNR)	ჰარმონიული კომპონენტების თანაფარდობა არარეგულარულ ხმოვან კომპონენტებთან	ასახავს ხმოვანი სიგნალის სისუფთავესა და პერიოდულობას	HNR-ის ცვლილება შესაძლოა დაკავშირებული იყოს ფონაციის ხარისხის გაუარესებასთან

აკუსტიკური პარამეტრი	განმარტება	ბიოლოგიური საფუძველი	შესაძლო მნიშვნელობა გულის უკმარისობის მართვაში
Mel-frequency Cepstral Coefficients (MFCC)	ხმის სპექტრული მახასიათებლების მათემატიკური აღწერა, რომელიც ეფუძნება ადამიანის სმენის მოდელს	ასახავს ხმის ენერგიის განაწილებას სხვადასხვა სიხშირის დიაპაზონში	ფართოდ გამოიყენება მანქანური სწავლების მოდელებში ხმოვანი კლასიფიკაციისთვის
Speech rate	მეტყველების სიჩქარე (სიტყვების ან მარცვლების რაოდენობა დროის ერთეულში)	დამოკიდებულია რესპირატორულ შესაძლებლობაზე, ნეირომუსკულურ კონტროლსა და ფუნქციურ მდგომარეობაზე	შესაძლოა შეიცვალოს ქოშინის, დადლილობის ან ფუნქციური შეზღუდვის დროს
Pause duration	მეტყველებისას პაუზების სიხშირე და ხანგრძლივობა	ასახავს სუნთქვითი ციკლისა და მეტყველების კოორდინაციას	შეიძლება გამოყენებულ იქნას რესპირატორული დატვირთვის ირიბი შეფასებისთვის
Maximum Phonation Time (MPT)	მაქსიმალური დრო, რომლის განმავლობაშიც პაციენტი ახორციელებს უწყვეტ ხმოვან ფონაციას	დამოკიდებულია ფილტვის მოცულობაზე, ჰაერის ნაკადსა და ხმის იოგების ფუნქციაზე	შესაძლოა ასახავდეს რესპირატორული ფუნქციის ცვლილებებს

4.1. ჯიტერი (Jitter)

ჯიტერი წარმოადგენს ხმის ფუნდამენტური სიხშირის ციკლთაშორის ცვალებადობას და გამოიყენება ხმის იოგების ვიბრაციის რეგულარულობის შესაფასებლად.

ნორმალურ პირობებში ხმის იოგების ოსცილაცია შედარებით სტაბილურია. ფონაციის პროცესში მცირე დარღვევები, რომლებიც დაკავშირებულია ქსოვილის მახასიათებლების, ჰაერის ნაკადის ან ნერვული კონტროლის ცვლილებებთან, შესაძლოა აისახოს ჯიტერის მაჩვენებლის ზრდაში.

გულის უკმარისობის მქონე პაციენტებში ჯიტერის ცვლილება არ განიხილება როგორც უშუალო პათოლოგიური მარკერი, თუმცა შესაძლებელია ასახავდეს საერთო ფიზიოლოგიური მდგომარეობის ცვლილებებს, რომლებიც გავლენას ახდენს ფონაციის პროცესზე.

4.2. შიმერი (Shimmer)

შიმერი აღწერს ხმის ამპლიტუდის ცვალებადობას თანმიმდევრულ ვოკალურ ციკლებს შორის. მისი ზრდა შეიძლება დაკავშირებული იყოს: ხმის იოგების ვიბრაციის არასტაბილურობასთან, ჰაერის ნაკადის ცვლილებასთან, ფონაციის კონტროლის დარღვევასთან. AI-ზე დაფუძნებული სისტემები ხშირად იყენებენ შიმერს სხვა აკუსტიკურ პარამეტრებთან კომბინაციაში, რადგან ერთი იზოლირებული მახასიათებელი, როგორც წესი, ვერ უზრუნველყოფს საკმარის დიაგნოსტიკურ სიზუსტეს.

4.3. ჰარმონია-ხმაურის თანაფარდობა (HNR)

HNR წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ინდიკატორს, რომელიც აფასებს რეგულარული ჰარმონიული კომპონენტების და არარეგულარული ხმოვანი კომპონენტების თანაფარდობას. მისი შემცირება ხშირად ასოცირდება: ხმის ხარისხის გაუარესებასთან, ხმის ტემბრის ცვლილებასთან, ფონაციის დარღვევასთან.

გულის უკმარისობის შემთხვევაში HNR-ის ცვლილებები შესაძლოა დაკავშირებული იყოს რესპირატორული დატვირთვისა და საერთო ფიზიოლოგიური მდგომარეობის ცვლილებებთან, თუმცა საჭიროა დამატებითი კვლევები მისი სპეციფიკური კლინიკური მნიშვნელობის დასადგენად.

4.4. მეტყველების დინამიკური მახასიათებლები

თანამედროვე ვოკალური ანალიზის სისტემები მხოლოდ ხმის ხარისხის შეფასებით არ შემოიფარგლება. ისინი ასევე აანალიზებენ მეტყველების სტრუქტურულ მახასიათებლებს. მნიშვნელოვან პარამეტრებს წარმოადგენს: მეტყველების სიჩქარე, პაუზების რაოდენობა, ფრაზის ხანგრძლივობა, ფონაციის უწყვეტობა. გულის უკმარისობის პროგრესირებისას რესპირატორული დატვირთვის ზრდამ შესაძლოა გამოიწვიოს მეტყველებისა და სუნთქვის კოორდინაციის ცვლილებები.

4.5. მრავალპარამეტრული ანალიზის მნიშვნელობა

თანამედროვე კვლევები მიუთითებს, რომ ვოკალური ბიომარკერების კლინიკური ღირებულება არ არის დამოკიდებული რომელიმე ერთი აკუსტიკური პარამეტრის ცვლილებაზე. უფრო პერსპექტიული მიდგომაა: მრავალი აკუსტიკური მახასიათებლის ინტეგრაცია, AI მოდელის გაწვრთნა და რისკის შეფასება ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა შეფასდეს კომპლექსური ცვლილებები, რომლებიც შესაძლოა დაკავშირებული იყოს გულის უკმარისობის მდგომარეობის გაუარესებასთან.

5. ვოკალური ბიომარკერების კლინიკური მტკიცებულებები გულის უკმარისობის დროს
ვოკალური ბიომარკერების გამოყენება გულის უკმარისობის მართვაში ჯერ კიდევ განვითარების ეტაპზე მყოფი მიმართულებაა. არსებული კვლევები ძირითადად ფოკუსირებულია ორი ძირითადი მიმართულებით:

1. ვოკალური მახასიათებლების კავშირი გულის უკმარისობის პროგნოზთან და არასასურველ კლინიკურ გამოსავლებთან
2. ხმის ანალიზის გამოყენება გულის უკმარისობის გაუარესების ადრეული გამოვლენის მიზნით.

მიუხედავად იმისა, რომ მიღებული შედეგები პერსპექტიულია, არსებული მტკიცებულებები ძირითადად მიღებულია მცირე ან საშუალო ზომის კოჰორტული კვლევებიდან და საჭიროებს დამატებით ვალიდაციას.

5.1. ვოკალური ბიომარკერი და გულის უკმარისობის გამოსავლები

ერთ-ერთი პირველი მნიშვნელოვანი კვლევა, რომელმაც შეაფასა ვოკალური ბიომარკერის კავშირი გულის უკმარისობის კლინიკურ გამოსავლებთან, გამოქვეყნდა *Journal of the American Heart Association*-ში (2020წ.). კვლევაში შეფასდა გულის უკმარისობის მქონე პაციენტების ხმოვანი სიგნალები და გაანალიზდა მათი კავშირი შემდგომ ჰოსპიტალიზაციასა და სიკვდილიანობასთან. ავტორებმა აჩვენეს, რომ ხმის ანალიზით მიღებული ბიომარკერი დამოუკიდებლად ასოცირდებოდა არასასურველ კლინიკურ გამოსავლებთან, რაც მიუთითებს მისი, როგორც ტელემედიცინისა და დისტანციური მონიტორინგის პოტენციური ინსტრუმენტის გამოყენების შესაძლებლობაზე. აღნიშნული კვლევის მნიშვნელოვანი წვლილი იყო იმ ჰიპოთეზის გაძლიერება, რომ ადამიანის ხმა შესაძლოა შეიცავდეს ფიზიოლოგიურ ინფორმაციას, რომელიც დაკავშირებულია გულის უკმარისობის პროგრესირებასთან. თუმცა, კვლევის შედეგების ინტერპრეტაციისას გასათვალისწინებელია რამდენიმე შეზღუდვა: კვლევა არ წარმოადგენდა ფართომასშტაბიან რანდომიზებულ კვლევას, საჭირო იყო დამატებითი გარე ვალიდაცია, ხმის ბიომარკერის კლინიკური გამოყენება არ შეფასებულა როგორც დამოუკიდებელი გადაწყვეტილების ინსტრუმენტი.

5.2. დისტანციური ხმის ანალიზი მწვავე დეკომპენსირებული გულის უკმარისობის დროს მკვლევართა სხვა ჯგუფმა შეისწავლა დისტანციური ხმის ანალიზის შესაძლებლობები მწვავე დეკომპენსირებული გულის უკმარისობის მქონე პაციენტებში. კვლევის ძირითადი იდეა ეფუძნებოდა ვარაუდს, რომ გულის უკმარისობის დეკომპენსაციისას განვითარებული მოცულობითი გადატვირთვა და ფილტვის შეშუპება შესაძლოა აისახოს ხმოვან მახასიათებლებში. ავტორებმა შეაფასეს ხმის მახასიათებლების ცვლილებები ჰოსპიტალიზაციის პერიოდში და აჩვენეს, რომ ხმის სიგნალის ანალიზს შესაძლოა ჰქონდეს დამატებითი ღირებულება პაციენტის კლინიკური მდგომარეობის შეფასებაში. ამ მიმართულების კვლევები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან ისინი ცდილობენ უპასუხონ პრაქტიკულ კითხვას: შესაძლებელია თუ არა ხმის ცვლილებებით გულის უკმარისობის გაუარესების იდენტიფიცირება მანამდე, სანამ პაციენტს განუვითარდება გამოხატული კლინიკური სიმპტომები? თუმცა, ამ ეტაპზე არსებული მონაცემები არ არის საკმარისი იმის

დასამტკიცებლად, რომ ვოკალური ბიომარკერები დამოუკიდებლად ცვლიან სტანდარტული მონიტორინგის მეთოდებს.

5.3. AHF-Voice კვლევა: ვოკალური ბიომარკერების პათოფიზიოლოგიური საფუძვლების შეფასება AHF-Voice წარმოადგენს ერთ-ერთ თანამედროვე პერსპექტიულ კვლევით პროექტს, რომლის მიზანია გულის მწვავე უკმარისობის დროს ხმის ცვლილებების დინამიკის შესწავლა.

კვლევა ეფუძნება პროსპექტულ კოჰორტულ დიზაინს და მიზნად ისახავს: ვოკალური ცვლილებების მახასიათებლების განსაზღვრას, მათი კავშირის შეფასებას პაციენტის კლინიკურ მდგომარეობასთან, ხმის ცვლილებების შედარებას ტრადიციულ კლინიკურ პარამეტრებთან, შესაძლო პათოფიზიოლოგიური მექანიზმების შესწავლას. კვლევის განსაკუთრებული მნიშვნელობა მდგომარეობს იმაში, რომ იგი ცდილობს არა მხოლოდ პროგნოზული მოდელის შექმნას, არამედ უკეთ გაიგოს, რატომ იცვლება ხმა გულის უკმარისობის დროს.

5.4. არსებული მტკიცებულებების კრიტიკული შეფასება

მიუხედავად ვოკალური ბიომარკერების მნიშვნელოვანი პოტენციალისა, მათი კლინიკური გამოყენების შეფასებისას აუცილებელია რამდენიმე ფაქტორის გათვალისწინება. პირველ რიგში, არსებული კვლევების უმრავლესობა არის აღწერითი ხასიათის და მათი მიზანი ძირითადად ტექნოლოგიის შესაძლებლობების შეფასებაა. მეორე მხრივ, ვოკალური მახასიათებლები შესაძლოა დამოკიდებული იყოს მრავალ ფაქტორზე, მათ შორის: ასაკზე, სქესზე, ენობრივ თავისებურებებზე, თანმხლებ დაავადებებზე, ხმის ჩაწერის პირობებზე. ამიტომ, მომავალი კვლევები უნდა ფოკუსირდეს: სტანდარტიზებული აუდიოპროტოკოლების შექმნაზე, მრავალცენტრულ ვალიდაციაზე, სხვადასხვა პოპულაციაში ალგორითმების შეფასებაზე, კლინიკურ გადაწყვეტილებებში მათი რეალური სარგებლობის განსაზღვრაზე.

6. შეზღუდვები და სამომავლო კვლევის მიმართულებები მიუხედავად იმისა, რომ ვოკალური ბიომარკერები წარმოადგენს პერსპექტიულ მიმართულებას ციფრულ კარდიოლოგიაში, მათი ფართო კლინიკური გამოყენება ამ ეტაპზე შეზღუდულია რამდენიმე მნიშვნელოვანი მეთოდოლოგიური და პრაქტიკული ფაქტორით.

6.1. არსებული მტკიცებულებების შეზღუდვები დღეისათვის გამოქვეყნებული კვლევების უმრავლესობა წარმოადგენს საძიებო ან პილოტურ კვლევებს, რომლებიც ძირითადად აფასებს ტექნოლოგიის ტექნიკურ შესაძლებლობებს და არა მის საბოლოო კლინიკურ ეფექტურობას. ძირითად შეზღუდვებს მიეკუთვნება: კვლევებში ჩართული პაციენტების შედარებით მცირე რაოდენობა, განსხვავებული კვლევითი დიზაინები, ვოკალური ჩანაწერების მიღებისა და დამუშავების არაერთგვაროვანი მეთოდოლოგია, საბოლოო გამოსავლების შეზღუდული შეფასება კლინიკური მიმართულებით. შესაბამისად, მიუხედავად არსებული დადებითი სიგნალებისა, საჭიროა ფართომასშტაბიანი, მრავალცენტრული კვლევები, რომლებიც დაადასტურებს

ვოკალური ბიომარკერების პროგნოზულ ღირებულებას რეალურ კლინიკურ პრაქტიკაში.

6.2. ალგორითმების ვალიდაცია და გენერალიზაციის პრობლემა ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მოდელების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გამოწვევაა მათი გამოყენებადობა იმ პოპულაციებში, რომლებზეც ისინი თავდაპირველად არ ყოფილა შემუშავებული. ვოკალური სიგნალი დამოკიდებულია მრავალ ინდივიდუალურ და გარემო ფაქტორზე, მათ შორის: ასაკზე, სქესზე, ენობრივ თავისებურებებზე, დიალექტზე, განათლებისა და მეტყველების სტილზე, ხმის ჩაწერის ტექნიკურ პირობებზე.

ამიტომ, ერთი პოპულაციიდან მიღებული ალგორითმის პირდაპირი გამოყენება სხვა პოპულაციაში შესაძლოა დაკავშირებული იყოს სიზუსტის შემცირებასთან. მომავალი კვლევები უნდა მოიცავდეს სხვადასხვა დემოგრაფიული და კულტურული ჯგუფების წარმომადგენლებს, რათა უზრუნველყოფილი იყოს მოდელების გარე ვალიდაცია და კლინიკური გამოყენებადობა.

6.3. სტანდარტიზაციის საჭიროება ვოკალური ბიომარკერების კვლევის ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევაა მონაცემთა შეგროვების სტანდარტიზაცია.

აუცილებელია განისაზღვროს: ხმოვანი ჩანაწერის ოპტიმალური ხანგრძლივობა, გამოყენებული ფონეტიკური დავალებები, ჩაწერის პირობები, მიკროფონის ტექნიკური პარამეტრები, მონაცემთა დამუშავების ერთიანი პროტოკოლები. სტანდარტიზებული მიდგომების გარეშე რთულდება სხვადასხვა კვლევის შედეგების შედარება და მეტაანალიზის ჩატარება.

6.4. ხელოვნური ინტელექტის გამჭვირვალობა და კლინიკური ინტერპრეტაცია

ხელოვნური ინტელექტის მოდელების გამოყენებისას მნიშვნელოვანი საკითხია მათი გადაწყვეტილებების ინტერპრეტაცია. კლინიკური პრაქტიკისთვის მნიშვნელოვანია არა მხოლოდ იმის ცოდნა, რომ ალგორითმმა გამოავლინა მაღალი რისკი, არამედ იმის გაგებაც, თუ რომელი მახასიათებლები განაპირობებდა აღნიშნულ პროგნოზს.

ამ მიმართულებით განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება: Explainable Artificial Intelligence (XAI) მიდგომებს, ალგორითმების გამჭვირვალობას, ექიმისთვის გასაგები გადაწყვეტილების მხარდაჭერის სისტემების შექმნას.

6.5. მონაცემთა უსაფრთხოება და ეთიკური საკითხები ვოკალური ბიომარკერების გამოყენება გულისხმობს პაციენტის ბიოლოგიური მონაცემების, კერძოდ კი ხმოვანი ჩანაწერების, შეგროვებასა და დამუშავებას. ამიტომ განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შემდეგი ფაქტორების გათვალისწინება: პერსონალური მონაცემების დაცვის უზრუნველყოფა, მონაცემთა დაშიფვრა, პაციენტის ინფორმირებული თანხმობა, მონაცემების გამოყენების მიზნების მკაფიო განსაზღვრა. ციფრული ჯანმრთელობის

ტექნოლოგიების განვითარებასთან ერთად მონაცემთა უსაფრთხოება წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ ეთიკურ და სამართლებრივ გამოწვევას.

6.6. სამომავლო კვლევის პერსპექტივები მომავალი კვლევები უნდა იყოს მიმართული რამდენიმე ძირითად მიმართულებაზე:

1. ფართომასშტაბიანი კლინიკური ვალიდაცია: საჭიროა მრავალცენტრული პროსპექტული კვლევები, რომლებიც შეაფასებს ვოკალური ბიომარკერების უნარს: გამოავლინოს გულის უკმარისობის გაუარესება, შეამციროს არასასურველი კლინიკური მოვლენები, გააუმჯობესოს პაციენტის მართვის პროცესი.

2. მულტიმოდალური ციფრული მოდელების განვითარება: ვოკალური მონაცემების ინტეგრაციამ სხვა ციფრულ ბიომარკერებთან შესაძლოა გაზარდოს პროგნოზული სიზუსტე. პერსპექტიული მიმართულებებია: ვოკალური მონაცემების გაერთიანება wearable მოწყობილობების მონაცემებთან, ფიზიოლოგიურ მაჩვენებლებთან ინტეგრაცია, ელექტრონულ სამედიცინო ჩანაწერებთან დაკავშირება.

3. კლინიკური ინტეგრაციის შეფასება

მნიშვნელოვანია განისაზღვროს არა მხოლოდ ალგორითმის ტექნიკური სიზუსტე, არამედ მისი რეალური გავლენა: პაციენტის მართვის კლინიკურ შედეგზე, ჯანდაცვის დანახარჯებზე, პაციენტის ცხოვრების ხარისხზე.

7. დასკვნა ვოკალური ბიომარკერები წარმოადგენს ციფრული კარდიოლოგიის სწრაფად განვითარებად მიმართულებას, რომელიც ეფუძნება ადამიანის ხმის, როგორც ფიზიოლოგიური ინფორმაციის მატარებელი სიგნალის, გამოყენებას. არსებული კვლევები მიუთითებს, რომ ხმის აკუსტიკური მახასიათებლების ანალიზს შესაძლოა ჰქონდეს პოტენციური გულის უკმარისობის მქონე პაციენტების დისტანციური მონიტორინგისა და კლინიკური გაუარესების ადრეული გამოვლენის მიმართულებით. მიუხედავად ამისა, თანამედროვე მტკიცებულებები ჯერ კიდევ არ არის საკმარისი იმისთვის, რომ ვოკალური ბიომარკერები განიხილებოდეს როგორც დამოუკიდებელი დიაგნოსტიკური ან თერაპიული გადაწყვეტილების ინსტრუმენტი. ამ ეტაპზე მათი ყველაზე რეალისტური როლი არის დამატებითი ციფრული ინსტრუმენტი, რომელიც ავსებს არსებულ კლინიკურ შეფასებას. მომავალში აუცილებელია მაღალი ხარისხის, მრავალცენტრული კვლევების ჩატარება, რომლებიც დაადასტურებს მათი გამოყენების სანდოობას, კლინიკურ ეფექტურობასა და ჯანდაცვის სისტემებში ინტეგრაციის შესაძლებლობას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Maor E, Perry D, Mevorach D, et al. Vocal Biomarker Is Associated With Hospitalization and Mortality Among Heart Failure Patients. *J Am Heart Assoc.* 2020;9(7):e013359. doi:10.1161/JAHA.119.013359. ([PubMed](#))
2. Amir O, Abraham WT, Azzam ZS, et al. Remote Speech Analysis in the Evaluation of Hospitalized Patients With Acute Decompensated Heart Failure. *JACC Heart Fail.* 2022;10(1):41-49. doi:10.1016/j.jchf.2021.08.008. ([PMC](#))
3. Kerwagen F, Bauser M, Baur M, et al. Vocal biomarkers in heart failure—design, rationale and baseline characteristics of the AHF-Voice study. *Front Digit Health.* 2025;7:1548600. doi:10.3389/fdgth.2025.1548600. ([PubMed](#))
4. Murton OM, Hillman RE, Mehta DD, et al. Acoustic speech analysis of patients with decompensated heart failure: a pilot study. *J Acoust Soc Am.* 2017;142(4):EL401.
5. Maor E, Sara JD, Orbelo DM, et al. Voice Signal Characteristics Are Independently Associated With Coronary Artery Disease. *Mayo Clin Proc.* 2018;93(7):840-847.
6. McDonagh TA, Metra M, Adamo M, et al. 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure. *Eur Heart J.* 2021;42(36):3599-3726.
7. Heidenreich PA, Bozkurt B, Aguilar D, et al. 2022 AHA/ACC/HFSA Guideline for the Management of Heart Failure. *Circulation.* 2022;145:e895-e1032.
8. Bozkurt B, Coats AJS, Tsutsui H, et al. Universal Definition and Classification of Heart Failure. *J Card Fail.* 2021;27(4):387-413.
9. Ponikowski P, Voors AA, Anker SD, et al. 2016 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure. *Eur Heart J.* 2016;37:2129-2200.
10. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med.* 2019;25:44-56.
11. Johnson KW, Torres Soto J, Glicksberg BS, et al. Artificial Intelligence in Cardiology. *J Am Coll Cardiol.* 2018;71(23):2668-2679.
12. Rajkomar A, Dean J, Kohane I. Machine Learning in Medicine. *N Engl J Med.* 2019;380:1347-1358.
13. Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, et al. A guide to deep learning in healthcare. *Nat Med.* 2019;25:24-29.

14. Steinhubl SR, Muse ED, Topol EJ. The emerging field of mobile health. *Sci Transl Med*. 2015;7(283):283rv3.
15. Dorsey ER, Topol EJ. State of Telehealth. *N Engl J Med*. 2016;375:154-161.
16. Teixeira JP, Oliveira C, Lopes C. Vocal acoustic analysis: jitter, shimmer and HNR parameters. *Procedia Technology*. 2013;9:1112-1122.
17. Maryn Y, Roy N, De Bodt M, Van Cauwenberge P, Corthals P. Acoustic measurement of overall voice quality: a meta-analysis. *J Acoust Soc Am*. 2009;126:2619-2634.
18. Godino-Llorente JI, Gómez-Vilda P, Blanco-Velasco M. Dimensionality reduction of a pathological voice quality assessment system. *J Acoust Soc Am*. 2006;119:2281-2293.
19. Rabiner LR, Juang BH. Fundamentals of Speech Recognition. Prentice Hall; 1993.
20. Huang X, Acero A, Hon HW. Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm and System Development. Prentice Hall; 2001.
21. Bhavnani SP, Narula J, Sengupta PP. Mobile technology and the digitization of healthcare. *Eur Heart J*. 2016;37:1428-1438.
22. Kotecha D, et al. Digital health technologies for heart failure management: current evidence and future opportunities. *Eur J Heart Fail*. 2021.
23. Cowie MR, Lam CSP. Remote monitoring and digital health tools in heart failure. *Lancet*. 2021.
24. Benjamins JW, et al. Digital biomarkers in cardiovascular disease: opportunities and challenges. *Eur Heart J Digit Health*. 2021.
25. Gensini GF, Alderighi C, Rasoini R, et al. Value of telemonitoring and digital health in cardiovascular disease. *Eur Heart J Suppl*. 2017.

Vocal Biomarkers in the Management of Heart Failure: Pathophysiological Basis, Current Evidence, and Future Perspectives

Abstract

Introduction: Chronic heart failure (HF) represents a major challenge in contemporary healthcare and is associated with a substantial risk of morbidity, mortality, and recurrent hospitalization. Despite advances in pharmacological therapy, a proportion of patients remain at high risk of decompensation following hospital discharge. Current remote monitoring strategies, including daily body weight assessment and self-reported symptoms, often fail to detect fluid retention and pulmonary congestion at an early stage. One of the major challenges in heart failure management is the early detection of clinical deterioration, particularly during the stage when fluid retention and pulmonary congestion begin to develop while overt clinical symptoms remain minimal. Existing monitoring approaches do not always allow for the early identification of underlying pathophysiological changes.

In recent years, advances in digital health and artificial intelligence (AI) technologies have created new opportunities for the remote management of chronic diseases. Among these, vocal biomarkers have attracted increasing interest. Vocal biomarkers are digital indicators derived from acoustic characteristics of the human voice that may reflect underlying physiological changes within the body.

Objective: The aim of this review is to evaluate the pathophysiological basis, current clinical evidence, technological potential, and existing challenges associated with the use of vocal biomarkers in heart failure management.

Methods: A narrative literature review was conducted. The literature search was performed using the PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science databases. The following keywords were used: “heart failure,” “vocal biomarkers,” “voice analysis,” “artificial intelligence,” “digital biomarkers,” and “remote monitoring.” Particular emphasis was placed on studies published between 2020 and 2025 that investigated the association between vocal characteristics and the clinical status of patients with heart failure, the risk of hospitalization, and the potential applications of voice-based remote monitoring.

Key Findings: Existing studies suggest that specific acoustic characteristics of the human voice may be associated with physiological changes occurring in patients with heart failure. Parameters commonly evaluated in vocal biomarker analysis include jitter, which reflects short-term variability in vocal fold vibration; shimmer, a measure of periodic variation in voice amplitude; the harmonic-to-noise ratio (HNR); speech rate; phonation duration; and the temporal structure of speech pauses. Artificial intelligence-based algorithms have demonstrated the potential to

detect subtle changes in vocal characteristics that may be associated with the early stages of heart failure deterioration.

However, the current evidence remains insufficient for definitive clinical implementation and requires further validation, particularly through large-scale, multicenter studies conducted across diverse patient populations.

Conclusion: Vocal biomarkers represent a promising emerging field in digital cardiology. Although they cannot currently replace standard clinical assessment of heart failure, they may serve as an additional digital tool for remote patient monitoring and early risk stratification. Further research is required to establish their clinical effectiveness, reliability, and feasibility of integration into routine clinical practice.

Keywords: heart failure; vocal biomarkers; artificial intelligence; digital biomarkers; remote monitoring; voice analysis; digital health; personalized medicine.